

SCIENTIÆ studia, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 213-41, 2010



Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhague: a filosofia platônica e a consolidação da teoria quântica

Anderson LEITE & Samuel SIMON



RESUMO

Este artigo discute o uso que Werner Heisenberg faz da filosofia grega clássica no âmbito dos debates acerca da teoria quântica realizados na primeira metade do século xx. Para esse autor, a ciência foi determinada pelo influxo de duas correntes de pensamento que surgiram na Grécia antiga: o materialismo e o idealismo. A partir de tal clivagem, Heisenberg fundamenta sua crítica aos opositores da Interpretação de Copenhague, além de justificar filosoficamente suas próprias teses sobre a mecânica quântica. Apesar de suas concepções filosóficas não serem passíveis de uma sistematização completa, a relação que Heisenberg estabeleceu entre a filosofia grega e os problemas da teoria dos quanta acabou por resultar em uma interpretação da realidade física na qual é predominante um platonismo e um incipiente estruturalismo matemático.

PALAVRAS-CHAVE • Mecânica quântica. Teoria quântica. Werner Heisenberg. Interpretação de Copenhague. Filosofia platônica. Idealismo. Materialismo.

INTRODUÇÃO

É inegável a influência das ideias de Niels Bohr (1885-1962) e Werner Heisenberg (1901-1976) sobre a comunidade dos físicos a partir de fins da década de 1920 no tocante à interpretação da nova teoria quântica. Tendo como marco o Congresso de Solvay em 1927, a disseminação do discurso de Bohr e de seu grupo estendeu-se por toda a década de 1930, sendo reforçada pelos físicos norte-americanos que chegavam aos centros difusores da ortodoxia na Europa: Copenhague, Göttingen e Cambridge. Segundo Cushing (cf. 1994, p. 121-3), o estilo pragmático dos físicos americanos e seu distanciamento, até mesmo desprezo, no tocante a questões filosóficas, contribuíram ainda mais para uma aceitação passiva da interpretação *standard* da teoria quântica.

O papel de Heisenberg na consolidação do “espírito de Copenhague” a partir de Solvay é notável. Sua confiança é demonstrada em uma carta datada do último dia do

Congresso: “no que diz respeito aos resultados científicos, estou completamente satisfeito. Seus pontos de vista e os de Bohr têm sido geralmente aceitos; ao menos objeções sérias não têm sido mais feitas, nem mesmo por Einstein ou Schrödinger” (Heisenberg *apud* Cassidy, 1991, p. 254). Com essa ampla aceitação entre a elite dos físicos da Europa, Bohr e Heisenberg iniciaram a propagação de suas ideias em outros campos.

Bohr, na década de 1930, ministrou palestras para os mais variados públicos, relacionando a noção de complementaridade com um sem-número de temas. Em 1933, ele proferiu a palestra “Luz e vida” na abertura do Congresso Internacional sobre Terapias através da Luz. Em 1937, participou do Congresso de Física e Biologia em Bolonha e, um ano depois, discursou no Congresso Internacional de Ciências Antropológicas e Etnológicas, em Copenhague, discorrendo sobre “Filosofia natural e culturas humanas” (cf. Bohr, 1995).



Figura 1. Heisenberg em Göttingen, 1924 (Fonte: <http://www.aip.org/history/heisenberg/po5.htm>).

Heisenberg, por sua vez, seguiu os passos de Bohr e, em 1929, realizou uma série de palestras (mas para platéias mais especializadas) pelos Estados Unidos, Japão, China e Índia. As preleções na Universidade de Chicago serviram de base para seu primeiro livro, intitulado *The physical principles of quantum mechanics* (*Os princípios físicos da mecânica quântica*), publicado em 1949 (cf. Heisenberg, 1949). Segundo Cassidy (1991, p. 265), este tinha como propósito expresse a disseminação do “espírito da teoria quântica de Copenhague” — o que explica a forte influência das ideias de Bohr em todo o texto.

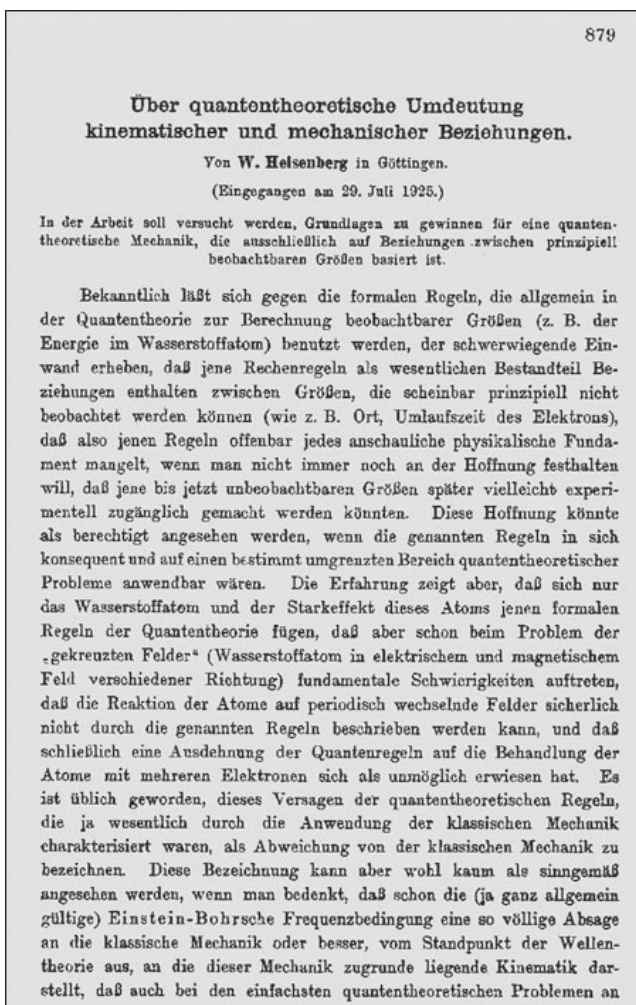
Iniciou-se, então, a prolífica carreira de Heisenberg como divulgador das ideias do grupo de Copenhague, dela resultando toda a imensa produção de artigos filosóficos e científicos que marcaram a vida intelectual do físico alemão. Estes, sem dúvida, carecem de certa sistematicidade, pois seriam “sempre feitos sob medida para o consumo público, sendo deste modo motivados pelos objetivos pessoais [de Heisenberg] perante cada audiência particular” (Cassidy, 1991, p. 255). Mas, apesar da assistematicidade, o efeito propagandístico das palestras e artigos é imenso. Eles são um dos pilares para o estabelecimento da hegemonia do “espírito de Copenhague” não somente entre os físicos, mas, principalmente, entre o público leigo que, conseqüentemente, acaba por ignorar toda a variedade de interpretações possíveis para os fenômenos quânticos.

1 HEISENBERG, HISTÓRIA DA CIÊNCIA E FILOSOFIA GREGA

Uma constante nesse *corpus* textual é a referência à cultura clássica, especialmente aos filósofos gregos. Desde jovem, Heisenberg havia se convencido de que dificilmente “podemos ocupar-nos de física atômica sem conhecermos a filosofia grega” (Heisenberg, 1962, p. 60). Essa intuição o acompanhou durante toda sua vida. Em 13 de julho de 1949, Heisenberg, a essa altura já laureado com um Nobel, retornou à instituição onde cursara o liceu, o *Maxmilians Gymnasium* em Munique, e proferiu uma palestra intitulada “*Naturwissenschaft und humanistische Bildung*” (“Ciência natural e formação humanista”). Pretendia defender que, mesmo em um mundo marcado pelo predomínio da ciência e da técnica, uma formação humanista baseada no estudo da história antiga e das letras clássicas, como a de Heisenberg, não poderia ser descartada como “um luxo, que só se podem permitir uns poucos para quem o destino tornou a luta pela vida mais fácil do que para os outros” (Heisenberg, 1962, p. 62). O que seria apenas um panegírico dedicado à escola onde passara sua juventude, tornou-se a oportunidade para Heisenberg defender que a ciência pode tirar benefícios da cultura humanista.

O currículo do *Maxmilians Gymnasium* – que era dirigido por Nicolaus Wecklein, avô materno de Heisenberg – incluía o ensino do grego e do latim clássicos. O último ano, por exemplo, era pautado pela leitura de Sófocles, Homero e de alguns diálogos platônicos, tais como *Apologia de Sócrates* e trechos do *Fédon* e do *Banquete* (cf. Hermann,

Figura 2. Primeira página do artigo de 1925 que expõe a mecânica de matrizes, publicado no volume 33 do *Zeitschrift für Physik*. (Fonte: <http://www.aip.org/history/heisenberg/p01.htm>).



1976, p. 12). Paralelamente a isso, Heisenberg havia desenvolvido um grande interesse pela matemática, a ponto de, ainda no *Gymnasium*, haver “aprendido por conta própria o cálculo diferencial e integral, que não fazia parte do currículo regular” (Piza, 2003, p. 73).¹

Mais de duas décadas depois, em um artigo escrito em 1976, a reverência pela cultura clássica ainda permanecia. Nesse artigo, escrito no ano de sua morte, Heisenberg afirma que muitos dos equívocos relacionados à teoria das partículas elementares seriam decorrentes do distanciamento que os cientistas mantinham das questões filosóficas. Para ele, a “boa física é inadvertidamente prejudicada por uma filosofia ruim” adotada pelos físicos (Heisenberg, 1989, p. 82). A separação entre a atuação científica e as formulações teóricas gerais teria origem no esquecimento, por parte dos cientistas, de uma das principais características do pensamento grego: “a estreita ligação entre formulações teóricas e atuação prática [...] e a aptidão em ordenar a polícroma multiplicidade da experiência, tornando-a acessível ao pensamento humano” (Heisenberg, 1962, p. 52-3). Na raiz de todas as conquistas da ciência, encontra-se, segundo Heisenberg, a inestimável contribuição dos filósofos gregos. Para ele, o cientista que tenta desvincular-se da filosofia grega comete um duplo erro. Primeiro, torna-se incapaz de detectar e analisar o discurso filosófico que seu trabalho carrega, veladamente, limitando sua compreensão dos problemas da própria física. Segundo, ignora-se o quinhão da herança helênica para a humanidade, quando se nega a possibilidade de aproximação entre ciência e filosofia. Dessa maneira, a filosofia forneceria instrumentos conceituais mais sofisticados para o cientista compreender melhor o seu trabalho e o seu objeto de estudo, aperfeiçoando o próprio desenvolvimento científico.²

Assim, ainda para Heisenberg, o fato de filosofia e ciência possuírem um mesmo berço nas *pólis* gregas há mais de dois mil e quinhentos anos, não é uma mera contingência histórica. Apesar da atual separação acadêmica entre as duas disciplinas, suas histórias estariam intimamente ligadas, pois certas escolhas conceituais surgidas na Antiguidade determinaram os caminhos da ciência em seu desenvolvimento nos

¹ Essa rara conjunção de interesses humanísticos, técnicos e matemáticos pode ser explicada, em parte, pela família de Heisenberg. Seu pai, August Heisenberg, tornou-se, em 1910, o único a ocupar uma cadeira de filologia bizantina em toda Alemanha. Sua produção acadêmica abrangia desde trabalhos de paleografia até estudos acerca da literatura e história do Império Bizantino. O avô, além de diretor do *Gymnasium* em Munique, chegou a ser um reconhecido especialista em tragédia grega.

² “As conquistas dos tempos modernos, de Newton e dos seus sucessores, apareceram-me como continuação imediata da obra em que tinham trabalhado matemáticos e filósofos gregos; o desenvolvimento completo da ciência parecia-me um todo único, e não me passou pela cabeça a ideia de considerar a ciência e a técnica como um mundo radicalmente diferente do da filosofia de Pitágoras ou de Euclides” (Heisenberg, 1962, p. 57).

séculos posteriores. Assim, nem os últimos cinco séculos, marcados pelo progresso extraordinário da técnica e da ciência, ficaram livres dessa influência.³

Portanto, ao analisar o uso que Heisenberg fez de conceitos herdados do pensamento grego antigo, é necessário compreender a sua visão da história da ciência, na qual a herança intelectual helênica se manifestava em duas correntes antagônicas: o *materialismo* e o *idealismo*. Para ele, da busca dos gregos por “um entendimento unificado dos fenômenos naturais”, surgiram “dois conceitos opostos” (o idealismo e o materialismo). Ambos prescreveriam diferentes respostas ao problema da estrutura fundamental da matéria. A teoria atômica criada por Leucipo e Demócrito é considerada o marco fundador do materialismo. A outra corrente, o idealismo, teria surgido com o Pitagorismo e Platão, mais especificamente com este último no *Timeu*. As duas tendências, afirma Heisenberg, não são apenas de interesse restrito a historiadores da filosofia. Para ele, a descoberta de Planck não se limitou a resolver um problema específico da termodinâmica. Uma de suas consequências foi reviver o debate entre Demócrito e Platão sobre os constituintes últimos da matéria.

Para Heisenberg, o século XVIII foi crucial na trajetória histórica do materialismo, pois, a partir daquele século, viu-se que “as experiências químicas podiam ser ordenadas e interpretadas satisfatoriamente por intermédio da hipótese atômica herdada da Antiguidade, se o átomo fosse considerado como o elemento imutável, verdadeiro e realmente existente, constituinte da matéria” (Heisenberg, 1962, p. 11).

E a influência do materialismo chegou até os séculos XIX e XX, a qual teria criado uma imagem “simplista” do mundo, sustentada tanto pelos avanços da química e da física da época, como pelo surgimento do “materialismo dialético” (Heisenberg, 1974, p. 9). Mesmo no século XX, muitos físicos, envolvidos nas pesquisas sobre as partículas elementares, estariam, segundo ele, sob a influência “mais ou menos inconsciente” de Demócrito.

Contudo, Heisenberg não identificava por completo o materialismo antigo com a filosofia que dominou as ciências naturais até as descobertas de Planck, pois a palavra “materialismo” assumiu no século XIX um significado unilateral que se distanciava da filosofia grega da natureza. A nova concepção de materialismo, nascida da revolução científica do século XVII, que teve como um dos marcos a publicação do *Principia* de Newton em 1687, sofreu o influxo da filosofia cartesiana e da “cisão entre realidade material e realidade espiritual” preconizada por Descartes (cf. Heisenberg, 1962, p. 61).

3 “O grande rio da ciência, que atravessa a nossa época, brota de duas fontes situadas no terreno da antiga filosofia e, embora mais tarde muitos outros afluentes tenham desagüado nesse rio, contribuindo para engrossar o seu fecundo caudal, a sua origem é, não obstante, sempre claramente reconhecível” (Heisenberg, 1962, p. 62, grifo nosso).



Figura 3. Niels Bohr e Albert Einstein, fotografados pelo físico austríaco Paul Ehrenfest por volta de 1927. (Fonte: Robson, 2005, p. 100).

A filosofia grega procurava um princípio unificador de todos os fenômenos observados no mundo, uma espécie de “matéria cósmica, vale dizer, uma substância universal que passaria por todas as transformações, da qual todas as coisas emergiriam para depois a ela retornar” (Heisenberg, 1995, p. 113). De Tales, passando por Demócrito e até Aristóteles, o conceito de matéria ligava-se a essa tentativa de compreender a totalidade do mundo por meio de um princípio fundamental de unificação – a *arché*. Séculos depois, Descartes funda uma filosofia baseada na oposição entre matéria e espírito e, assim, o conceito de matéria sofre uma transformação: no lugar da totalidade unificada, a ruptura.

Foi a distinção radical entre *res cogitans* e *res extensa* que teria modificado profundamente o conceito de matéria herdado da Antiguidade Clássica.⁴ Nesse momento da história, a escolha estabelecida, ou seja, a mistura entre o atomismo antigo e a metafísica cartesiana, *determinou* o desenvolvimento das ciências nos séculos posteriores. Assim, desconsiderou-se qualquer tipo de “força espiritual” como explicação plausível para os fenômenos concretos. Esse novo materialismo entenderia a matéria como o resultado de uma “cadeia causal de interações mecânicas”; como consequência, “o

⁴ Heisenberg faz uma interpretação que nos parece bastante correta das relações entre o sistema cartesiano e a física que se seguiu ao século XVII. “A antiga filosofia grega”, escreve ele, “tentara achar uma ordem, na infinita variedade de coisas e fenômenos, pela procura de algum princípio fundamental de unificação. Já Descartes procurou estabelecer a ordem por meio de uma divisão (isto é, separação) fundamental. Todavia, as três partes que resultam dessa divisão [Deus-Mundo-Eu] perdem algo de sua natureza, se cada qual for considerada separadamente das demais. Se quisermos mesmo fazer uso dos conceitos fundamentais cartesianos é essencial que Deus se encontre no mundo e no ‘Eu’, e é também essencial que o ‘Eu’ não possa ser realmente separado do mundo. Descartes, certamente, sabia da inegável necessidade dessa ligação, mas a filosofia e a ciência natural no período seguinte desenvolveram-se com base na polaridade entre *res cogitans* e *res extensa*, com a ciência natural detendo-se apenas na ‘coisa extensa’” (1995, p. 62-3).

conceito de matéria perdeu sua ligação com a ‘alma vegetativa’ da filosofia de Aristóteles” (Heisenberg, 1995, p. 114).

Haveria ainda outra característica do moderno materialismo que, além de diferenciá-lo do atomismo grego, seria uma das causas de sua visão de mundo “unilateral” e “simplista”. Em um texto de 1933, após descrever as transformações do conceito de matéria no decorrer da história, de Tales até Demócrito e Platão, Heisenberg se deteve em um problema conceitual: o materialismo, em seu curso histórico, com sua ênfase nas qualidades primárias e objetivas, não teria desconsiderado certos aspectos essenciais da realidade? Em sua avaliação, haveria uma gradativa substituição do termo *Naturerklärung* (interpretação da natureza) por *Naturerbeschreibung* (descrição da natureza), que seria “mais modesto” e acarretaria o abandono de um “conhecimento imediato e direto”, com o predomínio de um “entendimento analítico” (Heisenberg, 1952, p. 34).

Ao tentar compreender tal problema, Heisenberg recorre à análise platônica dos tipos de conhecimento realizada no Livro 6 da *República*. A distinção entre *diánoia* e *epistéme* é utilizada como um instrumento heurístico que permite compreender melhor a dinâmica entre o materialismo e o idealismo na história da física. Em Platão, os dois termos partilham atribuições epistemológicas e ontológicas, mas o físico alemão os emprega de maneira peculiar. *Diánoia* e *epistéme* seriam dois instrumentos conceituais que permitiriam uma melhor avaliação tanto da *interpretação da natureza* – de matriz idealista, qualitativa e baseada em um conhecimento direto e imediato – e da *descrição da natureza* – quantitativa, analítica e de raiz materialista. Nesse sentido, Heisenberg apresenta a seguinte interpretação da divisão da linha no famoso trecho 511 d-e da *República*:

[Platão] distingue quatro estágios da percepção: o mais alto deles é chamado de *epistéme* e corresponde ao conhecimento das coisas reais, à percepção e ao reconhecimento da sua natureza, como descrito na analogia [o mito da caverna]. O segundo estágio é conhecido como conhecimento discursivo – *diánoia* – e pode ser alcançado pelo estudo das ciências. Os dois últimos estágios relacionam-se com os dois primeiros assim como a crença o faz com a compreensão. Elas são chamadas de fé e crença (*pístis*) e conjectura (*eikasía*) (Heisenberg, 1952, p. 32).

Talvez por ser a transcrição de uma palestra, o texto apresenta uma confusão ca-nhestra entre os conceitos de *epistéme* e *nóesis*. Na *República* (6, 511 d-e), Platão distingue não exatamente a *epistéme*, mas a *nóesis* da *diánoia*, da *pístis* e da *eikasía*; na *República* 508e, Platão associa *epistéme* à verdade, em oposição à opinião (*dóxa*). Para todos os efeitos, tal confusão não altera substancialmente o argumento a ser analisado. Apenas

deve-se considerar que, quando Heisenberg cita *epistême*, na verdade ele refere-se à *nóesis*.⁵ De que modo esses dois conceitos servem de parâmetros heurísticos para a compreensão da dinâmica entre o materialismo e o idealismo no transcorrer da história? Em resposta a essa questão, ele insiste em sua tese: além da influência da metafísica cartesiana sobre o materialismo moderno, este também se distingue do atomismo antigo, e de toda a filosofia grega, pelo fato de seu grande bastião, a ciência moderna, ter abandonado a *epistême* como objetivo último, limitando-se à descrição matemática do mundo, ou seja, ao campo da *diánoia*.

Frente ao impacto do materialismo na história da ciência, a compreensão da natureza, nos últimos cinco séculos, limitou-se a afastar os dados da experiência imediata e, subjacente a eles, descobrir estruturas matemáticas. O ápice dessa postura epistêmica – marcada pela ênfase no quantitativo, em detrimento de outras propriedades dos objetos naturais – é encontrado, como já assinalamos, no alto nível de abstração que Newton inaugurou nos *Principia mathematica*. Para Heisenberg, com Newton “surtiu a possibilidade de unificar a infinita riqueza dos fenômenos em um formalismo matemático. Por meio de cálculos, o complexo processo individual pode ser compreendido como uma consequência de leis básicas e, portanto, ‘explicado’” (Heisenberg, 1974, p. 40).

É possível resumir essas reflexões de Heisenberg da seguinte maneira: o materialismo dominante na ciência moderna, anterior à descoberta de Max Planck, herdou de Demócrito a separação entre qualidades primárias e secundárias, com ênfase nas primeiras. Agregou-se a isso a cisão cartesiana entre *res extensa* e *res cogitans* que, além de esvaziar o ideal helênico de busca por uma fundamentação, uma ordem no cosmo, privilegiou a análise e a separação, desqualificando a subjetividade como algo relevante no âmbito da ciência. Daí, o recurso à oposição entre *diánoia* e *nóesis* (*epistême*, nos textos de Heisenberg): o materialismo moderno limita-se à *diánoia*, o conhecimento mediano, intermediário que, ao invés da intuição intelectual autossuficiente, procede de modo analítico, mediato, passo a passo. Concomitante a isso, o alto poder preditivo e as inumeráveis aplicações tecnológicas geradas pela nova ciência legitimaram o predomínio da *diánoia* em detrimento da *epistême*.

Heisenberg critica essa divisão, denominada “realismo metafísico”, e a primazia dada à *res extensa* frente à “coisa pensante”, primazia essa que acarretou o nascimento de um ideal de ciência puramente objetiva, sem referência ao “Eu”. No entanto,

⁵ Isso fica bastante evidente no seguinte trecho: “*epistême* é precisamente o estado de consciência no qual se pode parar e para além do qual não é preciso mais pesquisar. *Diánoia* é a habilidade de analisar em detalhes o resultado da dedução lógica. Ao que parece, em Platão, apenas a *epistême* fornece uma conexão com o verdadeiro, o essencialmente real, enquanto a *diánoia*, por mais que forneça de fato conhecimento, é um conhecimento desprovido de valores” (Heisenberg, 1974, p. 137).

ele reconhece que, na base dos sucessos da ciência moderna anterior à teoria quântica, a “hipótese de que se pode descrever o mundo sem fazer qualquer menção a Deus ou a nós mesmos” (Heisenberg, 1995, p. 64) pareceu ser a condição necessária para o desenvolvimento das ciências naturais. No entanto, após as descobertas de Planck e o subsequente desenvolvimento da teoria quântica, o realismo metafísico foi incapaz de compreender as novas situações colocadas.⁶

Para melhor compreender esse processo histórico, Heisenberg empregou um termo retirado da filosofia de Fichte: “autolimitação”.⁷ Esse conceito demonstraria que o predomínio da *diánoia* na história da ciência levou “ao fato de que praticamente todo progresso e conhecimento [da ciência] foram obtidos pelo sacrifício de importantes formulações anteriores de questões e ideias” (Heisenberg, 1952, p. 27). A autolimitação seria, neste caso, o abandono da busca por princípios gerais da natureza e sua substituição por uma análise dos fenômenos, concretizada pela ênfase no quantitativo, na busca de condições experimentais precisas, de medições exatas e de “uma terminologia livre de ambiguidades” (Heisenberg, 1974, p. 216).

A partir da descoberta do *quantum* de energia em 1900, até os subseqüentes experimentos relacionados às partículas elementares, a concepção da estrutura atômica da matéria revela uma transição de Demócrito a Platão, ou seja, do materialismo ao idealismo (cf. Heisenberg, 1974, p. 18). A mecânica quântica e a física de partículas

6 Para Heisenberg “na interpretação de Copenhague da teoria quântica, podemos proceder sem nos mencionarmos como indivíduos, embora não possamos ignorar que a ciência natural é feita por homens. A ciência natural não se restringe simplesmente a descrever e explicar a natureza, ela resulta da interação entre nós mesmos e a natureza, e propicia uma descrição que é revelada pelo nosso método de questionar. Essa foi uma possibilidade que não poderia ter ocorrido a Descartes, mas que torna impossível uma separação bem nítida entre o mundo e o ‘Eu’” (1995, p. 64).

7 Autolimitação do ego, ou *Selbstbeschränkung des Ich*, significa que “em cada ato de percepção nós selecionamos uma percepção dentre infinitas outras, o que limitaria o número de possibilidades futuras” (Heisenberg, 1952, p. 28). Beller chega a afirmar que tal conceito de Fichte teve influência na própria concepção de Heisenberg do princípio de incerteza: “Uma das mais férteis ideias presentes no artigo sobre a incerteza foi a de redução do pacote de onda durante a medição. Cada medição seleciona um valor definitivo para um observável ‘a partir da totalidade de possibilidades e limites das opções para todas as medições subseqüentes’ (Heisenberg, 1983, p. 74). Com essa ideia, Heisenberg inaugura o notório problema da medida na mecânica quântica, que atormenta físicos e filósofos da física quântica até os dias de hoje. A fonte dessa ideia [...] foi a autolimitação do ego da filosofia de Fichte: ‘a observação da natureza pelo homem mostra uma analogia para com o ato individual da percepção, que Fichte entendeu como um processo de *Selbstbeschränkung des Ich* [...]’ (Heisenberg, 1952, p. 28). Heisenberg explica a ideia de Fichte do seguinte modo: ‘em cada ato de percepção nós selecionamos uma percepção dentre infinitas outras, o que limitaria o número de possibilidades futuras’ (Heisenberg, 1952, p. 28). Estas palavras são quase idênticas às linhas da conclusão do artigo sobre a incerteza: ‘toda observação é uma seleção a partir de uma plenitude de possibilidades e uma limitação sobre o que é possível no futuro’” (Beller, 1999, p. 67). Ao aceitar a aproximação entre os dois textos feita por Mara Beller, tem-se a confirmação de uma influência *direta* de uma concepção puramente filosófica na produção científica de Heisenberg. Tão ou mais importante quanto mapear as origens dessa inusitada influência do idealismo alemão sobre um físico do século xx, é investigar as consequências dessa escolha filosófica nas subseqüentes interpretações do problema do colapso.

elementares, por exemplo, tornaram insustentável a concepção do átomo como uma entidade eterna, imutável e indivisível.⁸

Mas as partículas elementares não poderiam ser comparadas com o átomo de Demócrito e Leucipo? Não. Por mais que o atomismo antigo prive o átomo de uma série de atributos – restando apenas sua forma, movimento e arranjo espacial –, a atual descrição de uma partícula elementar exclui até mesmo esses aspectos mais abstratos do átomo de Demócrito. “Se quisermos oferecer uma descrição precisa de partícula elementar – e, aí, a ênfase está no termo ‘precisa’ – a única coisa que poderemos apresentar é uma função de probabilidade” (Heisenberg, 1995, p. 56). Ou seja, uma partícula elementar não pode ser identificada com um ponto material, mas sim com uma forma matemática. Com isso, não só o atomismo antigo, mas também suas herdeiras modernas – a química e a termodinâmica do século XIX – tornaram-se incapazes de tratar do mundo subatômico. As aporias que a teoria quântica parece impor à aplicabilidade dos conceitos da física clássica são decorrentes de certas escolhas filosóficas – a autolimitação que fundamenta a ciência moderna.

Para Heisenberg, a revolução quântica, derivada da revolução galileana e de sua abordagem formalista e abstrata dos fenômenos naturais, levou a física a um ponto no qual apenas o formalismo matemático não alcançava o que estava em jogo no mundo subatômico. É nesse sentido que se pode entender plenamente a seguinte frase: “tal como Copérnico e Galileu abandonaram, nos seus métodos, a ciência descritiva de Aristóteles, assim seremos forçados a abdicar do materialismo atômico de Demócrito e retomar as ideias de simetria da filosofia de Platão” (Heisenberg, 1990, p. 91). A compreensão dos fenômenos subatômicos exigia uma volta da ciência aos termos do idealismo: estabelecer um distanciamento do materialismo, do cartesianismo e do predomínio de um pensamento estritamente formal e matematizado, a *diánoia*.

2 MATERIALISMO, REALISMO, IDEALISMO E A INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE

Essa leitura da filosofia grega feita por Heisenberg vai permitir que ele responda aos críticos da Interpretação de Copenhague. Essas críticas, segundo ele, seriam herdeiras de uma “ontologia do materialismo”.⁹ No capítulo de *Física e filosofia*, intitulado

⁸ “Historicamente, a palavra ‘átomo’ – utilizada na física e química modernas – foi associada ao objeto errado, durante o renascimento da ciência no século XVII, pois as menores partículas pertencentes a um elemento químico são ainda, como se sabe, sistemas um tanto complexos de unidades ainda menores” (Heisenberg, 1995, p. 56).

⁹ “Todos os oponentes da Interpretação de Copenhague estão de acordo sobre um ponto. Segundo eles, seria desejável retornar ao conceito de realidade da física clássica ou, para fazermos uso de um termo filosófico mais geral, à *ontologia do materialismo*. Eles prefeririam voltar à ideia de um mundo real objetivo, em que mesmo as partes mais diminutas existissem objetivamente” (Heisenberg, 1995, p. 99-100).

“O desenvolvimento das ideias filosóficas, após Descartes, em comparação com a nova situação da teoria quântica”, Heisenberg apresenta suas ideias sobre a filosofia moderna, relacionando-a com o pensamento antigo e a teoria quântica. Como visto, sua opinião acerca da filosofia moderna, sobretudo com relação a Descartes, é crítica e contundente. Nesse texto, Heisenberg apresenta três formas de realismo: prático, dogmático e metafísico. Todas partilham da crença segundo a qual “nós ‘objetivaremos’ uma afirmação, se mantivermos que seu conteúdo independe das condições sob as quais ela possa ser verificada” (Heisenberg, 1995, p. 64). Logo, o realismo opõe-se à Interpretação de Copenhague, pois, segundo esta, “não podemos objetivar completamente o resultado de uma observação experimental, e não temos como descrever o que ‘acontece’ entre uma observação e outra” (Heisenberg, 1995, p. 43).

O *realismo prático* limita-se a assumir afirmações que podem “ser objetivadas” e que a maior parte de nossas experiências, na vida cotidiana, “consistam em tais asserções”, o que faz dele um pressuposto necessário da prática da ciência natural (Heisenberg, 1995, p. 65).

O *realismo dogmático* defende “não haver assertiva que diga respeito ao mundo material que não possa ser objetivada”. A física clássica estaria alicerçada nele, mas após a teoria quântica ficou óbvia a possibilidade de haver ciência exata fora dos preceitos do realismo dogmático. A “dificuldade” de Albert Einstein (1879-1955) em “entender e aceitar” a Interpretação de Copenhague deve-se a ele tomar o realismo dogmático como única base da ciência natural (Heisenberg, 1995, p. 65).

O *realismo metafísico* é definido, sucintamente, como a posição surgida da “partição cartesiana” e que identifica o mundo com a *coisa extensa*. Para o realista metafísico, o problema de nossas asserções poderem ou não ser “objetivadas” nem se coloca: é certo e seguro que elas existem (cf. Heisenberg, 1995, p. 64-5).

O criador da teoria da relatividade não foi o único alvo das críticas de Heisenberg. Durante a década de 1950, renasceram certas críticas à Interpretação de Copenhague, que a essa altura já era hegemônica. Se até esse momento os críticos se limitavam a poucos oponentes, o pós-guerra trouxe algo que não havia vingado antes: a elaboração de uma interpretação concor-



Figura 4. Heisenberg em sala de aula em 1936. (Fonte: <http://www.aip.org/history/heisenberg/po4.htm>).

rente ao modelo que, desde os fins dos anos 1920, havia se tornado a ortodoxia entre a comunidade de físicos. Ou seja, na revisão histórica empreendida por Heisenberg, os herdeiros de Demócrito e Descartes são, além de Einstein, David Bohm (1917-1992), Louis de Broglie (1892-1987), Max von Laue (1879-1960) e Erwin Schrödinger (1887-1961) que, além de taxados como representantes de uma filosofia ultrapassada, são acusados de sacrificarem “propriedades essenciais de simetria que a teoria quântica exige” (Heisenberg, 1995, p. 111). Esses autores desenvolveram, de maneira diferente, interpretações contrárias à de Copenhague. Na esteira da crítica aos diversos realismos, Heisenberg fará então uso de novos argumentos derivados da filosofia de Platão para desqualificar essas interpretações.

Suas mais ásperas e diretas críticas contra as interpretações concorrentes vieram a lume durante uma das palestras apresentadas na Universidade de St. Andrews, na Escócia, durante os anos de 1955 e 1956. Em 1958, seriam publicadas em um único livro, *Physics and philosophy: the revolution in modern science* (*Física e filosofia: a revolução na ciência moderna*), uma espécie de summa das opiniões de Heisenberg sobre ciência, filosofia e história da ciência. O capítulo 8, “Críticas e contrapropostas à Interpretação de Copenhague da teoria quântica”, é dedicado exclusivamente a suas restrições frente às propostas de Bohm, Imre Fényes, A. D. Alexandrov, D. I. Blokhintsev, Schrödinger, Einstein e Max von Laue.

De início, Heisenberg declara que a Interpretação de Copenhague provocou o afastamento entre a física e o materialismo que prevaleceu durante o século XIX. Todavia, a influência do materialismo foi esmagadora: abrangeu desde o pensamento filosófico, passando pela ciência natural e chegando até “o homem da rua”. A profunda ascendência das teses materialistas sobre os mais variados pontos de vista explica “que muitas tentativas tenham sido feitas para criticar a interpretação de Copenhague” (Heisenberg, 1995, p. 99).

Por mais que Heisenberg estabeleça, como será visto adiante, uma diferenciação entre os críticos da Interpretação de Copenhague, todos os opositores são considerados materialistas nostálgicos, que não perceberam – ou se perceberam, não aceitaram – a revolução introduzida de modo inexorável pelo grupo de Copenhague e Göttingen.

Nesse caso, os opositores foram divididos em três grupos. O primeiro seria caracterizado pelo fato de não pretender mudar a Interpretação de Copenhague no que diz respeito a suas previsões empíricas. Seu foco seria, antes, modificar a linguagem da teoria quântica aproximando-a da física clássica. Formado por David Bohm, Imre Fényes, A. D. Alexandrov e D. I. Blokhintsev, esse grupo tenciona “mudar a filosofia sem tocar na física” (Heisenberg, 1995, p. 108). Quanto ao segundo grupo, representado pelo físico húngaro Lajos Jánossy, o objetivo seria modificar a teoria quântica em suas estruturas matemáticas, de maneira a chegar a uma interpretação filosófica di-

versa. O último grupo é composto por fundadores da teoria quântica, como Einstein e Schrödinger juntamente com Max von Laue. Haveria, para esses autores, uma “insatisfação generalizada com os resultados da interpretação de Copenhague, especialmente com suas conclusões filosóficas, sem, todavia, fazer contrapropostas definidas” (Heisenberg, 1995, p. 99).

Segundo ele, os argumentos de Einstein seriam os seguintes:

O esquema matemático da teoria quântica parece propiciar uma descrição perfeitamente adequada no que diz respeito aos atributos estatísticos dos fenômenos atômicos. Mas [...] a interpretação usual não permite a descrição do que realmente acontece independente das observações, ou entre duas delas. Mas alguma coisa deve ter acontecido, sobre isso não há dúvida; essa “alguma coisa” precisa ser descrita, seja em termos de elétrons, ondas ou *quanta* de luz, mas, a menos que ela seja descrita de alguma maneira, a tarefa da física não está terminada. Não se pode admitir que essa “alguma coisa” diga respeito somente ao ato de observação. O físico deve postular, em sua ciência, que ele está estudando um mundo que não construiu, o qual estará sempre presente e basicamente inalterado, mesmo em sua ausência (Heisenberg, 1995, p. 109).

Por mais que o texto contenha trechos que lembram a profissão de fé realista que abre o artigo onde se elabora o argumento EPR¹⁰ (cf. Einstein; Podolsky & Rosen, 1981, p. 90), não faz nenhuma referência a ele. Contra a exigência de uma “descrição do que realmente acontece independente das observações”, Heisenberg argumenta que devido ao fato de utilizarmos a linguagem da física clássica – um refinamento de nossa linguagem cotidiana – para descrever os fenômenos quânticos, haveria um limite intransponível na efetivação de tal tarefa.¹¹

¹⁰ O fulcro do texto era demonstrar que o formalismo quântico, apesar de correto e consistente, era incompleto. Defender a completeza da mecânica quântica teria como consequência, estando o argumento EPR correto, a volta do conceito de simultaneidade na troca de informação entre dois sistemas físicos que, apesar de restrita a magnitudes microscópicas, inacessíveis para o experimentador, era algo inadmissível após a relatividade restrita (cf. Brown, 1981, p. 73). Por isso, os autores rematam o artigo com a seguinte afirmação: “Somos forçados a concluir que a descrição quântica da realidade física através das funções de onda não é completa” (Einstein; Podolsky & Rosen, 1981, p. 90). É emblemática a frase de abertura do artigo, de forte cunho realista: “Qualquer consideração séria a respeito de uma teoria física deve levar em conta a diferença entre a realidade objetiva, que independe de qualquer teoria, e os conceitos físicos com os quais a teoria opera. Pretende-se que tais conceitos tenham correspondência com a realidade objetiva, e por meio deles construímos uma imagem dessa realidade” (Einstein; Podolsky & Rosen, 1981, p. 90).

¹¹ Tese apresentada por Bohr no Congresso Internacional de Física, em Como na Itália, em 1927 e depois publicada em artigo (cf. Bohr, 1928). O assim denominado *postulado quântico* pode ser resumido na seguinte afirmação de Bohr: “a teoria quântica é caracterizada pelo reconhecimento de uma limitação fundamental nas ideias da física clássica quando aplicadas a fenômenos atômicos. A situação assim criada é de natureza peculiar, já que a nossa interpretação do material experimental repousa essencialmente em conceitos clássicos” (Bohr, 2000, p. 135).

3 TEORIA QUÂNTICA, IDEALISMO E A ESTRUTURA DA MATÉRIA

Para Heisenberg, essa limitação só poderia ser superada via o idealismo derivado das doutrinas platônicas¹² sobre a estrutura da matéria, descritas no *Timeu*. Ao contrário do materialismo de Demócrito, no qual os constituintes últimos da matéria eram inalteráveis e indestrutíveis partículas materiais, o idealismo¹³ platônico considera que as menores partículas de matéria são, por assim dizer, apenas formas geométricas, no caso, os sólidos regulares da geometria. Esses sólidos, diferentemente dos átomos, podem ser divididos em partes ainda menores. Os sólidos geométricos podem ser decompostos em triângulos que, segundo Heisenberg, deixam de ser matéria, pois não possuem dimensões espaciais.¹⁴ A forma geométrica, uma das poucas características intrínsecas dos átomos, deixa de ser um atributo destes, como o era em Demócrito, tornando-se a estrutura subjacente da matéria.

E por que Heisenberg relaciona a doutrina platônica com a estrutura da matéria segundo a física moderna? O trecho a seguir é representativo do modo como Heisenberg interpreta a física platônica:

Quando duas partículas elementares de elevada energia colidem, originam-se várias partículas no processo de desintegração, mas os fragmentos resultantes não são necessariamente menores do que as partículas iniciais. (...) o conceito de divisibilidade perdeu assim o seu significado e, conseqüentemente, o mesmo aconteceu com o conceito de partícula mínima. Se a energia se converte em matéria, isso acontece porque a energia adota a forma equivalente de partículas elementares. Esta forma aparece como a representação de um grupo de transformação, tal como a rotação no espaço ou a transformação de Lorentz. (...) elas são as entidades menores, autênticos blocos construtores da matéria, ou são elas meramente representações matemáticas dos grupos de simetria pela qual a matéria é construída? (Heisenberg, 1990, p. 47).

¹² Os termos “platonismo” ou “doutrinas platônicas” são aqui utilizados em sentido *lato*, como “a doutrina segundo a qual os objetos da matemática têm uma existência real. É, na filosofia da matemática, a doutrina equivalente ao realismo na teoria do conhecimento” (Audi, 2006, p. 597).

¹³ Fica claro que o idealismo tratado por Heisenberg é do tipo *objetivo*, que “sustenta que as ideias existem por si próprias, e que nós apenas as ‘apreendemos’ ou as descobrimos”. A outra variante de idealismo seria o idealismo *subjetivo*: “as ideias existem apenas nas mentes dos sujeitos: não há mundo externo autônomo” (Bunge, 2002a, p. 179).

¹⁴ “Assim, em Platão, no limite mais baixo das séries das estruturas materiais, não existe efetivamente algo material, mas uma forma matemática. A raiz última a partir da qual o mundo pode ser uniformemente inteligível é, segundo Platão, a simetria matemática, a imagem, a ideia; esse conceito é, portanto, denominado idealismo” (Heisenberg, 2004, p. 12).

Para ele, inclusive, “‘no começo era a simetria’ é, certamente, uma expressão melhor do que ‘no começo era a partícula’ de Demócrito [...] nossas partículas elementares são comparáveis aos corpos regulares do *Timeu* de Platão. São modelos originais, as ideias da matéria” (Heisenberg, 1996, p. 278-9).¹⁵ A substituição do materialismo tradicional pelo platonismo adviria das partículas elementares não mais se adequarem a uma imagem dos átomos como “indestrutíveis” e “eternos”. Os experimentos realizados nos aceleradores de partículas demonstram que uma partícula pode ser transformada em outras partículas. Essas últimas seriam estruturas matemáticas da natureza, propriedades ou equações caracterizadas pela sua invariância frente às transformações (conversões) das próprias partículas umas nas outras.¹⁶

Segundo Heisenberg, um dos efeitos nefastos do materialismo moderno foi a ruptura com o modelo epistemológico platônico apresentado na *República*, pois o desenvolvimento das ciências como um todo levou “os dois tipos de percepção, *epistémē* e *diánoia*” a uma “relação de exclusão mútua” (Heisenberg, 1952, p. 34). Contudo, em seu contexto original, as duas noções eram interdependentes. Quando Heisenberg aproxima as simetrias matemáticas das estruturas geométricas e matemáticas do *Timeu*, ele não só tenta expurgar o materialismo moderno da física, mas, também, talvez inconscientemente, reaproxima o “conhecimento intermediário” da “intelecção pura”. Do mesmo modo que os objetos sensíveis são decorrentes da mistura entre as formas geométricas e o princípio material sensível (cf. Reale, 1994, p. 148), a *diánoia* representa uma ciência intermediária que, no entanto, permite uma descrição do mundo físico, especialmente a “perda da certeza”, para empregar os termos de Cattanei.¹⁷

¹⁵ Quando Heisenberg refere-se às simetrias, ele está pensando nos grupos de simetria. A importância desses grupos na teoria quântica é bem conhecida e inegável. Para um bom tratamento dessa questão, mesmo em seus aspectos epistemológicos, ver, por exemplo, Wigner, 1979, especialmente o capítulo 3. Weyl, em seu livro *Simetria*, também examina o papel da simetria na teoria quântica (entre outras aplicações). Para Weyl, “a mecânica quântica representa o estado de um sistema físico por um vetor em um espaço de muitas, de fato, de infinitas dimensões [...]. Assim, a mais profunda e a mais sistemática parte da teoria dos grupos, a teoria da representação de um grupo por meio de transformações lineares, vem aqui à baila. Devo refrear-me de apresentar uma descrição mais precisa desse difícil assunto. Mas aqui a simetria mostra-se mais uma vez ser a chave para um campo de grande variedade e importância” (Weyl, 1989 [1952], p. 135).

¹⁶ “Tal como os corpos elementares regulares de Platão, as partículas elementares da física moderna são definidas por condições matemáticas de simetria; não são eternas nem invariáveis e, portanto, dificilmente podem ser chamadas “reais” na verdadeira acepção da palavra. São antes representações daquelas estruturas matemáticas fundamentais a que se chega nas tentativas de continuar subdividindo a matéria; representam o conteúdo das leis fundamentais da natureza. Para a ciência natural moderna não há mais, no início, o objeto material, porém a simetria matemática” (Heisenberg, 2004, p. 26).

¹⁷ Elisabetta Cattanei vai um pouco além e considera uma certa ambiguidade na geometria: “Nas ciências matemáticas e, em particular, na geometria, Platão capta uma ambiguidade, refletindo talvez sobre a situação da pesquisa sobre axiomas em seu tempo: trata-se de formas de saber intelectual que, contudo, não se desvinculam totalmente do visível, e que em si continuam hipotéticas. O *Timeu* fornece uma imagem viva dessa ambiguidade. Dela, Platão

O retorno ao idealismo, devido à revolução quântica e à física das partículas elementares, não significa uma supressão da *diánoia* – algo impossível para a ciência moderna altamente matematizada. Levando as ideias de Heisenberg até seu desfecho lógico, pode-se considerar que o idealismo nas ciências naturais contemporâneas promoveu um reequilíbrio entre as duas noções. Contudo, essa foi uma conclusão que Heisenberg nunca expressou.¹⁸

4 A CONSTRUÇÃO DA INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE: FILOSOFIA GREGA E RETÓRICA

As mais corriqueiras opiniões acerca das ideias filosóficas de Heisenberg, especialmente entre seus críticos, são as que o taxam de ser um positivista ou um instrumentista ingênuo que se deixou contaminar pelas filosofias da moda na Europa das décadas de 1920 e 1930. Filósofos conceituados, tais como Karl Popper e Mario Bunge,¹⁹ adotam por inteiro essa interpretação. No entanto, pode-se corroborar a tese de Popper e Bunge de que Heisenberg foi tão somente um emulo do positivismo? Ao que parece não. Pelas seguintes razões. Desde o artigo de 1925 que expõe a mecânica de matrizes,

não deixa de sublinhar o aspecto que a epistemologia contemporânea chamou de ‘perda da certeza’, mas, por outro lado, explica seu poder de medição: o limite à pura intelectualidade da matemática, na medida em que a aproxima do sensível, torna-a instrumento plausível de explicação do mundo físico” (Cattanei, 2005, p. 280-1).

¹⁸ Catherine Chevalley expressa do seguinte modo esse problema na obra do físico alemão: “como compreender que Heisenberg possa sugerir uma ontologia das estruturas matemáticas sem deixar de ler a história da física como um processo de autolimitação do conhecimento? [...] Heisenberg não oscilaria entre a epistemologia e a ontologia, com o risco de cair em um ecletismo pouco convincente?” (1992, p. 127).

¹⁹ Um trecho de Popper mostra a aprovação entusiástica por Moritz Schlick das ideias de Heisenberg: “Qualquer teste que se faça com o objetivo de verificar a trajetória entre os dois experimentos perturbará tanto essa trajetória que os cálculos de trajetória exata tornam-se ilegítimos. A propósito desses cálculos exatos, Heisenberg diz: ‘... é pura questão de gosto querer alguém atribuir qualquer realidade física à calculada história passada do elétron’. Com essas palavras, Heisenberg pretende claramente dizer que esses cálculos de trajetória, insuscetíveis de teste, são, do ponto de vista do físico, destituídos de significação. Schlick comenta essa passagem dizendo: ‘eu me expressaria de maneira ainda mais incisiva, manifestando completo acordo com as concepções fundamentais, tanto de Bohr quanto de Heisenberg, que acredito serem incontestáveis. Se um enunciado concernente à posição de um elétron, em dimensões atômicas, não é verificável, não podemos atribuir-lhe qualquer sentido; torna-se impossível falar da ‘trajetória’ de uma partícula entre dois pontos em que foi observada” (Popper, 2000, p. 242). Mario Bunge segue o mesmo viés: “por volta de 1935, Bohr e Heisenberg, juntamente com Born, Pauli e outros, propuseram a chamada Interpretação de Copenhague, com a benção do Círculo de Viena. Segundo ela, a medição de uma variável não apenas perturba seu valor, como a cria. Dito de maneira negativa: enquanto não é medido, o *quanton* carece de propriedades. Desse modo, ele nem sequer existe, a não ser como constituinte de uma não-analisável e selada unidade: sujeito (experimentador) – objeto (*quanton*) – aparato [...] obviamente, esta hipótese é antropomórfica e, inclusive, mágica” (2002b, p. 79).

até as palestras de 1958 que resultaram no livro *Física e filosofia*, Heisenberg insiste que a física só trata com grandezas observáveis, no que se refere ao mundo quântico. O artigo de 1925 é finalizado com o seguinte parágrafo:

Se um método para determinar dados quânticos teóricos utilizando relações entre grandezas observáveis, tal como proposto aqui, pode ser tido como satisfatório em princípio, ou se esse método, após tudo, acabar por representar uma aproximação por demais grosseira para o problema físico de construir uma mecânica quântica teórica [...] só pode ser decidido com investigações matemáticas mais intensas do método que foi superficialmente empregado aqui (Heisenberg *apud* Van der Waerden, 1967, p. 276).

O que iniciou como uma atitude quase que desesperada do jovem Heisenberg diante do emaranhado de dados experimentais e inconsistências teóricas relativas à estrutura do átomo (cf. Van der Waerden, 1967, p. 37-40) acabou por desenvolver-se nos anos subsequentes. Já em 1927, quando da elaboração do princípio de incerteza, as grandezas observáveis são tidas como a única fonte de significado físico para os fenômenos quânticos:

Quando queremos ter clareza sobre o que se deve entender pelas palavras “posição do objeto”, por exemplo, do elétron (relativamente a um dado referencial), então é preciso especificar experimentos definidos com o auxílio dos quais se pretenda medir a “posição do elétron”; caso contrário, a expressão não terá nenhum significado (Heisenberg *apud* Chibeni, 2005, p. 183).

Quase três décadas depois, em 1958, Heisenberg apresenta os mesmos argumentos, em um tom assumidamente filosófico:

De um ponto de vista muito geral, não há maneira alguma de descrever o que acontece entre duas observações consecutivas. É, certamente, tentador dizer que o elétron deve ter estado em algum lugar, no intervalo de tempo entre essas duas observações, e que, portanto, o elétron deveria ter descrito algum tipo de trajetória ou órbita, mesmo que seja impossível saber qual. Esse seria um argumento razoável na física clássica. Na teoria quântica, porém, teria sido um abuso de linguagem que, como veremos depois, não pode ser justificado [...]. Se quisermos descrever o que ocorre em um evento atômico, deveremos compreender que o termo “ocorre” pode somente ser aplicado à observação, e não ao estado de coisas durante duas observações consecutivas (Heisenberg, 1995, p. 42-6).

No entanto, pode-se corroborar a tese de Popper e Bunge de que Heisenberg foi tão somente um êmulo do positivismo? Ao que parece não, por duas razões (cf. Heisenberg, 1995, 1996).

A obra de Heisenberg é inegavelmente perpassada por ideias *similares* às dos positivistas. Mas não existem provas textuais nas fontes consultadas que comprovem uma influência de fato de filósofos positivistas sobre Heisenberg. Além disso, seu diálogo com a filosofia grega e moderna inseriu uma série de noções e conceitos que o

afastam de um positivismo puro e simples. A influência de Ernst Mach – uma das referências fundamentais do positivismo – é rejeitada.²⁰ Heisenberg afirmou que nunca o leu seriamente e o contato com sua obra foi posterior à criação da mecânica matricial (cf. Hermann, 1976, p. 28). A opção de utilizar apenas grandezas observáveis foi, segundo Heisenberg, inspirada pela teoria especial da relatividade (cf. Heisenberg, 1996, p. 78-9).

Outro motivo, que distancia Heisenberg das “bênçãos do Círculo de Viena”, pode ser aduzido a partir do seguinte trecho:



Figura 5. Heisenberg e Bohr, 1935 ou 1936. (Fonte: <http://www.aip.org/history/heisenberg/po8.htm>).

Embora o movimento positivista lógico vivesse seu apogeu quando a mecânica quântica se desenvolveu, as formas de antirrealismo, que comparecem na interpretação “ortodoxa” dessa teoria, não se identificam com o reduativismo positivista estrito (Chibeni, 1997, p. 31).

Bohr e Heisenberg não advogavam que as proposições teóricas deveriam ser reduzidas “a proposições observacionais através de certas convenções linguísticas (regras de correspondência) para que seu verdadeiro conteúdo empírico e significado se evidenciem” (Chibeni, 1997, p. 31).²¹

²⁰ Um detalhe pode ser levantado, e mesmo estudado com maior rigor: apesar da rejeição da influência de Mach, Pauli, declarada influência de Heisenberg, era afilhado do filósofo austríaco. Haveria uma influência de Mach sobre Pauli e, conseqüentemente, sobre Heisenberg?

Mas, então, é possível deduzir algum tipo de filosofia consistente da obra de Heisenberg, particularmente no que se refere ao uso que ele faz da filosofia clássica, especialmente do atomismo, do platonismo e da história da ciência? É possível uma reconstrução racional dessas suas ideias filosóficas? Ao levar em conta as fontes consultadas, a resposta é *não*.

Não existiria um sistema subjacente ou um desenvolvimento intelectual com um sentido logicamente determinado que permitisse afirmar algo como “Heisenberg defendia uma concepção x_1 que foi se desenvolvendo no decorrer de sua carreira e o conduziu a uma concepção x_2 ”. No entanto, observam-se alguns temas recorrentes que foram incorporando as mais diversas teses filosóficas. Heisenberg, em diferentes momentos e em função do contexto de estabelecimento e construção da teoria quântica, busca na filosofia elementos teóricos que legitimem suas convicções científicas – especialmente no que diz respeito à Interpretação de Copenhague.

Pode-se colocar uma outra questão crucial: existiu uma interpretação de Copenhague, no sentido de uma escola, de um grupo, que partilhasse crenças e práticas homogêneas? Talvez os próprios textos de Heisenberg possam esclarecer essa questão.

Em *A parte e o todo*, o físico alemão utiliza um recurso estilístico que remete aos textos de duas matrizes do pensamento helênico: o supracitado Platão e o historiador Tucídides. O estilo dialogado platônico seria fundido com o artifício que Tucídides utilizou na sua *História da guerra do Peloponeso*: o de fazer cada orador falar “como, em minha opinião, ele o teria feito naquelas circunstâncias, atendo-me o mais estritamente possível à linha de pensamento que norteou sua fala” (Tucídides *apud* Heisenberg, 1996, p. 7).

A parte e o todo é um texto de recriação de uma série de diálogos entre o autor e outras personalidades importantes em sua vida, Einstein e Bohr, por exemplo, em uma forma textual denominada “condensação livre” (Heisenberg, 1996, p. 7). Nele, encontramos um trecho que, fora do contexto, parece não dizer muito:

Sinto-me fascinado pela ideia de que a simetria seja algo muito mais fundamental do que a partícula em si. Isso se enquadra no espírito da teoria quântica, tal como Bohr sempre a concebeu. Também se enquadra na filosofia de Platão, mas isso não interessa agora (Heisenberg, 1996, p. 193, grifo nosso).

²¹ A considerar as análises de Chibeni (1997, p. 16) e de Dutra (2003, p. 42-3) sobre os argumentos antirrealistas acerca da subdeterminação das teorias pelas observações, a insistência de Heisenberg em declarar a Interpretação de Copenhague como a única variante correta da teoria quântica, pois só ela levaria em conta certas características genuínas da natureza, acabaria por aproximá-lo de um certo realismo, o que o distancia ainda mais do positivismo lógico.

Além de recriar diálogos de seu próprio passado segundo sua opinião, Heisenberg reconstruiu, sob uma ótica estritamente pessoal, a história da física no século xx. A estratégia da “condensação livre” de seu livro de memórias foi utilizada por ele desde a década de 1950. O trecho destacado é típico: relaciona “simetria”, “Bohr” e “Platão”; a teoria quântica é identificada com as ideias de Bohr e relacionada ao platonismo. Apesar do tom despretensioso, o trecho representa bem como se elaborou a criação daquilo que se convencionou chamar de Interpretação de Copenhague. Ela seria a única interpretação legítima da teoria quântica, além de ser a única filosoficamente aceitável, pois reintroduzia o idealismo na física.

Segundo Mara Beller, as opiniões filosóficas dos fundadores da Interpretação de Copenhague são marcadas por inconsistências e mudanças, em função das circunstâncias teóricas e sociopolíticas. O próprio Bohr mudou suas ideias sobre a mecânica quântica com o passar dos anos. Beller elaborou uma lista das inúmeras tentativas de pesquisadores em enquadrar o pensamento de Niels Bohr sob um único termo. O resultado foi uma série de interpretações conflitantes, todas elas com “boa evidência textual” (Beller, 1996, p. 183), e que inclui desde a avaliação de Popper, que considera Bohr um subjetivista, até Feyrerabend que o considera um defensor do objetivismo. Pesquisadores recentes se dividem: para Murdoch (1994), Bohr seria um realista, enquanto para Faye (1994), ele seria um antirrealista.

Diante desse cenário, a opção metodológica de Beller (1996, p. 183), consoante à opção adotada aqui frente às inconsistências da filosofia de Heisenberg, é evitar a ambição de “eliminar as inconsistências”.²² A partir de uma análise mais detalhada, revela-se que “a” Interpretação de Copenhague não possui a consistência e homogeneidade sugeridas pelos relatos de Heisenberg. Outros autores, como Pessoa Júnior (2005, p. 97) e Howard (2004),²³ também enfatizam a ausência de uma coerência entre os criadores da mecânica quântica e defendem que a Interpretação de Copenhague é uma criação tardia. Howard chega a afirmar que, nos escritos de Bohr, não se endossa

²² “Enquanto estudiosos têm investido competência e engenhosidade em fornecer a Bohr uma posição consistente, adoto uma atitude diferente e aceito que as opiniões conflitantes de realismo e positivismo (nas versões instrumentalistas de Bohr e operacionalistas de Heisenberg) são ambas inevitavelmente presentes. Meu objetivo não é curar essa ‘esquizofrenia’ [...] eliminando as inconsistências, mas analisar as fontes, usos e propósitos de tais desvios nas posições filosóficas” (Beller, 1996, p. 184-5).

²³ “Aquilo que é chamado de Interpretação de Copenhague corresponderia apenas em parte ao ponto de vista de Bohr (...). Muito do que é tido como Interpretação de Copenhague é encontrado nos escritos de Werner Heisenberg, mas não em Bohr. De fato, Bohr e Heisenberg discordaram de modos importantes e profundos. A ideia de que existiria um ponto de vista unitário é uma invenção do pós-guerra, de responsabilidade, em grande parte, de Heisenberg” (Howard, 2004, p. 669-70).

grande parte do que é considerado como Interpretação de Copenhague;²⁴ a concepção de um ponto de vista unitário relativo aos físicos do eixo Copenhague–Göttingen seria um “mito pós-guerra”, uma criação de Heisenberg em 1955, com a introdução do termo “Interpretação de Copenhague”.²⁵



Figura 6. Max Born e Werner Heisenberg discordavam profundamente de Einstein a respeito da mecânica quântica (Fonte: Robson, 2005, p. 96).

²⁴ “Não há colapso do pacote de onda, não há antirrealismo, nem subjetivismo. A interpretação da complementaridade de Bohr não é o que passou a ser posteriormente considerado como a Interpretação de Copenhague” (Howard, 2004, p. 675).

²⁵ Vale notar que o texto no qual se teve a gênese da “Interpretação de Copenhague” (Heisenberg, 1955) foi a participação de Heisenberg em um volume em homenagem a Bohr, organizado por Pauli e Rosenfeld.

Não se deve ignorar, nesse debate, o fator relacionado com o surgimento de interpretações concorrentes, como é o caso da teoria de David Bohm. O retorno de uma teoria ligada aos parâmetros da física clássica, tão similar, em seus pressupostos filosóficos, à mecânica ondulatória – a ponto de permitir o retorno de trajetórias e de uma visualização²⁶ que se considerava perdida – não pode ser descartada como uma das motivações de Heisenberg no estabelecimento de um *corpus* de teses bem estabelecidas acerca da teoria quântica. Mais do que uma forma de combater as críticas frente à interpretação ortodoxa, o uso que Heisenberg fez da filosofia seria uma maneira de fornecer legitimidade e consistência filosófica e histórica à Interpretação de Copenhague.

Logo, o uso que Heisenberg faz de algumas noções da filosofia grega no decorrer de sua carreira parece endossar a seguinte tese: até os anos 1940, as ideias acerca dos termos platônicos *diánoia*, *epistème* e a oposição entre materialismo e idealismo servem apenas como crítica à ciência anterior à descoberta do *quantum* de ação. Apenas no pós-guerra é que esses termos são utilizados em um outro contexto, no caso, de legitimação da recém-criada Interpretação de Copenhague e desqualificação das teses opostas.

Independentemente de diferentes contextos históricos terem motivado importantes mudanças no pensamento filosófico de Heisenberg – o que produziu uma “esquizofrenia”, segundo Beller (1996, p. 183) – considera-se que, a partir do uso que ele faz da filosofia grega, é possível extrair de cada uma dessas fases certos elementos referentes a uma ontologia. Vejamos como isso se dá a partir dos idos de 1930.

No ano de 1933, Heisenberg escreve um texto (cf. 1952a), que é produto de uma preleção dada no ano anterior. É um texto típico do período de divulgação da teoria quântica e não existe nenhuma menção a uma Interpretação de Copenhague. Mas o texto todo é perpassado por uma crítica direta à ciência moderna, seu viés materialista e à adoção de uma “descrição da natureza” em detrimento de uma “interpretação da natureza”. A relação de “exclusão mútua” entre a *diánoia* e a *epistème* no decorrer da história da ciência moderna também já se apresenta nele. No entanto, não se faz menção a uma interpretação específica da mecânica quântica que se ligue a um desses termos platônicos.

Mesmo que de maneira negativa, existe uma ontologia que indiretamente pode ser extraída desse texto, pois a crítica que surge dessas páginas não é contra o realismo,

²⁶ “Antes da mecânica quântica, se olharmos para as teorias bem sucedidas da física, todas eram suscetíveis – apesar disso não ser exigido – a uma estória causal de figura [*causal pictures story*], para falar de modo figurado. E tradicionalmente dizia-se que a mecânica quântica mostrava que isso não poderia mais ser feito. Mas aí veio Bohm e mostrou que poderia sim!” (Cushing, 2000, p. 17).

mas sim contra uma de suas variedades, o realismo classicista: “a tese de que a realidade tem uma estrutura próxima às nossas concepções e intuições clássicas a respeito do mundo” (Pessoa Júnior, 2005, p. 104). Era esse o realismo que posteriormente foi taxado de “ontologia do materialismo” por Heisenberg e que foi superado com o nascimento da teoria quântica. Pessoa Júnior (2005, p. 104) cita uma série de “suposições classicistas que são violadas por alguma interpretação da teoria quântica” e que são criticadas por Heisenberg nesse texto: o *corpuscularismo* seria uma herança do atomismo helênico; a tese de que o mundo existe em quatro dimensões não tem sentido no mundo quântico em função do caráter abstrato da função de onda. Esse texto de 1933 traz em seu bojo imagens de uma ontologia que não tem mais validade para Heisenberg, uma espécie de ontologia negativa, decorrente da austeridade epistêmica da mecânica matricial e da influência de Bohr e de seus interditos epistemológicos, o que explica a ausência de imagens “positivas” quanto ao que se pode falar acerca do mundo quântico.

É somente em 1937, que Heisenberg (cf. 1952b) estabelece a oposição entre o materialismo dos atomistas gregos e o pitagorismo do *Timeu*, inclusive aproximando este último à ideia de átomo que surgiu na física moderna. Apesar do foco do texto residir na inadequação da imagem tradicional do átomo herdada de Leucipo e Demócrito frente ao átomo da física moderna, a aproximação entre o átomo e as estruturas matemáticas platônicas pode ser considerada um movimento em direção a proposições “positivas” quanto à ontologia do mundo quântico. Entretanto, ainda permanece a separação entre as restrições epistemológicas do estilo instrumentalista, pedra de toque da filosofia do eixo Copenhague-Göttingen, e tais observações realistas. Heisenberg, mesmo que houvesse percebido essa contradição entre as duas teses, não elaborou nenhum tipo de resolução dela.

Na década de 1940, em função do início da proliferação de partículas elementares, Heisenberg acrescenta um argumento que se tornaria recorrente a partir dessa época: a relação entre a energia e a *arché* dos pré-socráticos. Mais uma guinada na direção de uma ontologia “positiva”: as partículas elementares, tijolos últimos da matéria, são a combinação das simetrias com a energia, o mais próximo que se tem para um substrato material que Heisenberg já havia proposto. Mas o fantasma do materialismo é mantido a distância fazendo-se recurso ao conceito de *arché*, aliando Aristóteles e Platão: energia e simetrias coadunam-se do mesmo modo que matéria (*hylè*) e forma (*morphè*) conjugadas (cf. Heisenberg, 1952, p. 95-108).

Em meio às turbulências da Segunda Guerra Mundial, entre maio de 1941 e o fim de 1942, Heisenberg redige o manuscrito *Ordnung der Wirklichkeit* (*A ordenação da realidade*) que só foi publicado bem posteriormente em 1984. Se os textos filosóficos do físico alemão sempre foram pautados pela brevidade e por certa falta de compromisso com a sistematicidade de suas ideias, o mesmo não se aplica a esse manuscrito

(cf. Heisenberg, 1998). Ao contrário da maioria de seus artigos, derivados de palestras e seminários para públicos não-especializados, esse texto foi escrito com fins pessoais, uma maneira de fazer entender como a obra de sua vida “se harmoniza com o todo” (Cassidy, 1991, p. 448). As palavras de Chevalley deixam claro o valor do manuscrito e sua importância: “o manuscrito de 1942 é acima de tudo um escrito filosófico e constitui a elaboração mais densa e sintética das ideias de Heisenberg sobre a significação epistemológica da física contemporânea e sobre o problema do conhecimento em geral” (1998, p. 11).

Dois princípios estruturam os argumentos do manuscrito: a divisão em níveis de realidade relacionados e um esvaziamento do papel dos conceitos de espaço e tempo em suas acepções clássicas. Apesar de sua importância, o texto praticamente não se refere à filosofia helênica, o que evidencia um enfoque diferenciado de Heisenberg na defesa filosófica da Interpretação de Copenhague.

No pós-guerra, iniciava-se um novo período de turbulência para os defensores do “espírito de Copenhague da teoria quântica”. Einstein mantinha-se irredutível em suas reservas quanto à teoria quântica nos moldes de Copenhague. Físicos do outro lado da Cortina de Ferro, além de tecerem críticas contra a interpretação usual, propunham modelos alternativos inspirados no materialismo dialético. Por fim, como vimos, o jovem David Bohm elabora uma teoria que parece ir de encontro a todos os preceitos e restrições duramente elaborados e divulgados desde o fim dos anos 1920.

É nesse período que o uso que Heisenberg faz da filosofia grega sofre sua grande estruturação. Os ataques aos antigos e novos opositores da Interpretação de Copenhague tornam-se explícitos. A noção de “ontologia do materialismo”, que articula a filosofia de Descartes com o atomismo de Demócrito, ambas conduzindo ao materialismo do século XIX, também surge nessa época.

Como não bastava apenas atacar os opositores, mas legitimar essa Interpretação, Heisenberg elabora a visão segundo a qual, como também foi visto, a história da ciência é perpassada pela oposição entre duas filosofias de matriz grega: o materialismo e o idealismo. Este último, nomeado assim pela primeira vez em um texto de 1958 (Heisenberg, 2004, p. 14), liga-se ao pitagorismo e à concepção de matéria apresentada no *Timeu*. O idealismo só retornou à ciência, segundo Heisenberg, após 1900, com a descoberta do *quantum* de ação por Planck, sendo ele a única filosofia capaz de abarcar os fenômenos peculiares da nova física.

CONCLUSÃO

A oscilação entre epistemologia e ontologia na obra de Heisenberg pode ser descrita como uma tensão entre as restrições epistemológicas, que o acompanham desde a invenção da mecânica quântica, e a sua busca por um conteúdo ontológico que não recorresse às imagens do materialismo. Para lidar com esse impasse e conciliar as restrições epistemológicas que a mecânica quântica impôs à física clássica com uma ontologia mínima, Heisenberg propõe uma “nova realidade física objetiva” (Chevalley, 1992, p. 128), utilizando-se dos conceitos de potência e ato de Aristóteles²⁷ e, curiosamente, de conceitos probabilistas. Seria um modo de estabelecer o equilíbrio entre *diánoia* formalista e a crença *realista* em estruturas matemáticas, como as descritas no *Timeu*.

Ao tratar de um dos problemas mais espinhosos da mecânica quântica, o problema da medição e do colapso do pacote de onda,²⁸ Heisenberg consegue harmonizar duas tendências em seu pensamento que se mostravam incomunicáveis. Suas restrições epistemológicas acerca da possibilidade do uso de grandezas que não fossem observáveis acabaram por coadunar-se com sua busca por uma ontologia não-materialista e sua rejeição do realismo classicista, passando a receber um tratamento

²⁷ As referências a Aristóteles são acompanhadas pelo uso dos conceitos de *dýnamis* e *enérgeia* – tradicionalmente traduzidos como potência e ato, respectivamente. Heisenberg interpretou esses dois conceitos do seguinte modo: “Na filosofia de Aristóteles, a matéria foi imaginada na relação entre forma e matéria. Tudo o que percebemos no mundo dos fenômenos, à nossa volta, é matéria que encontrou sua forma. A matéria não é uma realidade por si mesma, mas só uma possibilidade, uma *potentia*; somente a forma lhe dará existência. Em um processo natural, a “essência” (para usar a expressão aristotélica) passa de mera possibilidade à realidade, pela presença da forma. A matéria aristotélica certamente não é uma matéria específica, como água ou ar, nem tampouco o vazio; ela é um tipo de substrato corpóreo indefinido, que tem em si a possibilidade de vir-a-ser ao se consubstanciar na forma” (Heisenberg, 2004, p. 14).

²⁸ Pessoa Júnior expõe de maneira bastante clara o problema da medição na teoria quântica. “A mecânica quântica”, escreve ele, “pode ser estruturada da seguinte maneira. Um sistema fechado é descrito por um ‘estado’ que evolui no tempo de maneira *determinista* (de acordo com a equação de Schrödinger). Ao contrário da mecânica clássica, esse estado em geral fornece apenas as ‘probabilidades’ de se obterem diferentes resultados de uma medição. Após a medição, o sistema passa a se encontrar em um novo estado, estado este que depende do resultado obtido. Assim, pode-se dizer que no decorrer da medição o sistema evoluiu de maneira *indeterminista*. Essa transição tem sido chamada de ‘colapso do pacote de onda’ ou ‘redução de estado’, sendo descrita pelo postulado da projeção de von Neumann. O chamado ‘problema da medição’ surge da oposição entre uma evolução determinista regida pela equação de Schrödinger e a evolução indeterminista descrita pelo postulado da projeção. Essa oposição torna-se um problema quando se assumem duas hipóteses: (1) um estado quântico pode ser atribuído ao aparelho de medição macroscópico (podendo incluir o observador consciente); (2) o ‘sistema composto’ (que inclui o objeto e o aparelho) pode ser considerado fechado em relação ao meio ambiente. Neste caso, o sistema composto deveria evoluir de maneira determinista (pois seria um sistema quântico fechado), mas ao mesmo tempo estariam ocorrendo reduções de estado indeterministas durante as medições efetuadas pelo aparelho no objeto. Como conciliar estas duas possibilidades contraditórias?” (1992, p. 178).

aristotélico a partir da década de 1950. O caminho na direção dessa nova realidade física ou, em outras palavras, a busca por um conteúdo ontológico nas estruturas matemáticas da teoria quântica, fica nítida quando Heisenberg afirma que as ondas de probabilidade introduziam “algo entre a ideia de evento e o evento real”, isto é, “um tipo estranho de realidade física a mediar entre possibilidade e realidade” (Heisenberg, 1995, p. 36).

O que resta então? Após todas as interdições epistemológicas, existe algum mínimo rastro de uma ontologia do mundo quântico na visão de Heisenberg? Ao distinguir a Interpretação de Copenhague do “positivismo”, que “toma as percepções sensoriais do observador como elementos básicos da realidade”, o físico alemão afirma que a Interpretação de Copenhague “considera as coisas e processos (passíveis de uma descrição clássica), isto é, o real, como o fundamento de toda a interpretação física”. O real, contudo, não é o do materialismo: além de “coisas”, ele é composto por “processos”. O fato de nosso conhecimento ser incompleto “por si mesmo”, em função das leis quânticas, não evita a possibilidade de postulação da existência desse real. No lugar dos pontos materiais, do império da *res extensa*, Heisenberg vê processos e simetrias fundamentais essencialmente platônicas, tidas por ele como “uma característica genuína da natureza” (Heisenberg, 1995, p. 111).

O que se pode concluir dessa análise até os idos da década de 1950? Parece ser possível afirmar que Heisenberg apoia-se na filosofia, especialmente na filosofia platônica, como um recurso retórico para estabelecer o que se chamou a Interpretação de Copenhague ou, mais ainda, o uso que ele fez da filosofia grega pode ser considerado como um dos principais elementos na construção de uma doutrina homogênea e unitária dessa interpretação. Se, por um lado, Platão é uma referência positiva, Demócrito e Leucipo, assim como Descartes, são utilizados como referências negativas, uma “má influência” na compreensão dos próprios conceitos físicos, especialmente da nova teoria dos fenômenos atômicos. A repartição da história da ciência em uma tendência atomista/materialista em contraposição a uma platônica/idealista – com um privilégio das estruturas matemáticas, via os grupos de simetria – serve não apenas a uma melhor compreensão da mesma, mas também funciona como uma estratégia de desqualificação de interpretações concorrentes da Interpretação de Copenhague.☛

Anderson LEITE

Pesquisador do Grupo de Lógica e Filosofia da Ciência,

Universidade de Brasília, Brasil.

andersonleite@unb.br

Samuel SIMON

Professor Adjunto do Departamento de Filosofia,

Universidade de Brasília, Brasil.

samuel.simon@pq.cnpq.br

ABSTRACT

This article discusses Werner Heisenberg's use of ancient Greek philosophy in the debates about quantum theory that occurred during the first half of the 20th century. For Heisenberg, science was determined by two concurrent streams of thought that arose in ancient Greece: materialism and idealism. Starting from this separation, Heisenberg not only develops his criticism of the opponents of the Copenhagen interpretation, but also philosophically justifies his own theses regarding quantum mechanics. Although his philosophical conceptions are not themselves open to complete systematization, the relation that Heisenberg established between Greek philosophy and the problems of quantum theory finally resulted in an interpretation of physical reality, which is deeply marked by a kind of Platonism and an incipient mathematical structuralism.

KEYWORDS: Quantum mechanics. Quantum theory. Werner Heisenberg. Copenhagen interpretation. Platonic philosophy. Idealism. Materialism.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUDI, R. (Ed.). *Dicionário de filosofia Cambridge*. São Paulo: Paulus, 2006.
- BELLER, M. The rhetoric of antirealism and the Copenhagen spirit. *Philosophy of Science*, 63, p. 183-204, 1996.
- _____. *Quantum dialogue – the making of a revolution*. Chicago: The University of Chicago Press, 1999.
- BOHR, N. The quantum postulate and the recent development of atomic theory. *Nature*, 121, p. 580-90, 1928.
- _____. Física atômica e conhecimento humano. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.
- _____. O postulado quântico e o recente desenvolvimento da teoria atômica. In: PESSOA JÚNIOR, O. (Org.). *Fundamentos da física 1 – Simpósio David Bohm*. São Paulo: Livraria da Física, 2000. p. 135-59.
- BORN, M. et al. *Problemas da física moderna*. São Paulo: Perspectiva, 2004.
- BROWN, H. O debate Einstein-Bohr sobre a mecânica quântica. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 2, p. 51-89, 1981.
- BUNGE, M. *Dicionário de filosofia*. São Paulo: Perspectiva, 2002a.
- _____. *Ser, saber, hacer*. Cidade do México: Paidós, 2002b.
- CASSIDY, C. *Uncertainty: the life and science of Werner Heisenberg*. New York: W. H. Freeman, 1991.

- CASSIN, B. (Org.). *Nos grecs et leurs modernes: les stratégies contemporaines d'appropriation de l'antiquité*. Paris: Gallimard, 1992.
- CATTANEI, E. *Entes matemáticos e metafísica: Platão, a Academia e Aristóteles em confronto*. São Paulo: Loyola, 2005.
- CHEVALLEY, C. La physique quantique et les grecs. In: CASSIN, B. (Org.). *Nos grecs et leurs modernes: les stratégies contemporaines d'appropriation de l'antiquité*. Paris: Gallimard, 1992. p. 151-87.
- _____. Avant-propos & Introduction. In: HEISENBERG, W. *Philosophie: le manuscrit de 1942*. Paris: Seuil, 1998. 9-245.
- CHIBENI, S. *Aspectos da descrição física da realidade*. Campinas: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, 1997.
- _____. Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27, 2, p. 181-92, 2005.
- CUSHING, J. *Quantum mechanics – historical contingency and the Copenhagen hegemony*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.
- _____. A visão de mundo da mecânica quântica: determinista ou indeterminista? In: PESSOA JÚNIOR, O. (Org.). *Fundamentos da física 1 – Simpósio David Bohm*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2000. p. 1-13.
- DUTRA, L. H. A. *Introdução à teoria da ciência*. Florianópolis: Editora da UFSC, 2003.
- EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B. & ROSEN, N. A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa? *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 2, p. 90-6, 1981.
- FAYE, J. A defense of Bohr's anti-realist approach to quantum mechanics. In: FAYE, J. & FOLSE, H. J. (Ed.). *Niels Bohr and contemporary philosophy*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994. p. 97-115.
- FAYE, J. & FOLSE, H. J. (Ed.). *Niels Bohr and contemporary philosophy*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- HEISENBERG, W. *The physical principles of the quantum theory*. Chicago/New York: University of Chicago/Dover, 1949.
- _____. *Philosophic problems of nuclear science*. New York/London: Pantheon/Faber and Faber, 1952.
- _____. On the history of physical interpretation of nature. In: _____. *Philosophic problems of nuclear science*. New York/London: Pantheon/Faber and Faber, 1952a. p. 27-40.
- _____. Ideas of ancient natural philosophy in modern physics. In: _____. *Philosophic problems of nuclear science*. New York/London: Pantheon/Faber and Faber, 1952b. p. 53-9.
- _____. The development of the interpretation of the quantum theory. In: PAULI, W.; ROSENFELD, L. & WEISSKOPF, V. (Ed.). *Niels Bohr and the development of physics. Essays dedicated to Niels Bohr on the occasion of his seventieth birthday*. London/New York: Pergamon/McGraw-Hill, 1955. p. 12-29.
- _____. *A imagem da natureza na física moderna*. Lisboa: Livros do Brasil, 1962.
- _____. *Across the frontiers*. New York: Harper & Row, 1974.
- _____. Quantum-theoretical re-interpretation of kinematic and mechanic relations. In: WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (Ed.). *Quantum theory and measurement*. Princeton: Princeton University Press, 1983. p. 62-84.
- _____. *Encounters with Einstein: and other essays on people, places, and particles*. Princeton: Princeton University Press, 1989.
- _____. *Páginas de reflexão e auto-retrato*. Lisboa: Gradiva, 1990.
- _____. *Física e filosofia*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1995.
- _____. *A parte e o todo*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- _____. *Philosophie: le manuscrit de 1942*. Paris: Seuil, 1998.
- _____. A descoberta de Planck e os problemas filosóficos da física atômica. In: BORN, M. et al. *Problemas da física moderna*. São Paulo: Perspectiva, 2004. p. 9-27.

- HERMANN, A. *Werner Heisenberg: 1901-1976*. Bonn: Inter Nationes, 1976.
- HOWARD, D. Who invented the “Copenhagen Interpretation”? A study in mythology. *Philosophy of Science*, 71, p. 669-82, 2004.
- MURDOCH, D. The Bohr-Einstein dispute. In: FAYE, J. & FOLSE, H. J. (Ed.). *Niels Bohr and contemporary philosophy*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994. p. 303-24.
- PAULI, W.; ROSENFELD, L. & WEISSKOPF, V. (Ed.) *Niels Bohr and the development of physics. Essays dedicated to Niels Bohr on the occasion of his seventieth birthday*. London/New York: Pergammon/McGraw-Hill, 1955.
- PESSOA JÚNIOR, O. O problema da medição em mecânica quântica: um exame atualizado. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 3, 2, 2, p. 177-217, 1992.
- _____. (Org.). *Fundamentos da física 1 – Simpósio David Bohm*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2000.
- _____. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005. v. 1.
- POPPER, K. R. *A lógica da pesquisa científica*. São Paulo: Cultrix, 2000.
- PIZA, A. *Schrödinger e Heisenberg*. São Paulo: Odysseus, 2003.
- REALE, G. *História da filosofia antiga*. São Paulo: Loyola, 1994. v. 2.
- REDHEAD, M. *Incompleteness, non-locality and realism*. Oxford: Clarendon, 1987.
- ROBSON, A. *Einstein: os 100 anos da teoria da relatividade*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- VAN DER WAERDEN, B. *Sources of quantum mechanics*. New York: Dover, 1967.
- WHEELER, J. A. & ZUREK, W. H. (Ed.). *Quantum theory and measurement*. Princeton: Princeton University Press, 1983.
- WEYL, H. *Symmetry*. Princeton: Princeton University Press, 1989 [1952].
- WIGNER, E. *Symmetries and reflections*. Woodbridge: Ox Bow Press, 1979.

